تعیین ویژگی‌های فیزیکی شبکه معادل در تحلیل جریان درون محیط‌های متخلخل با استفاده از مدل‌های شبکه‌ای

سید حسین افضلی[1] محمدجواد عابدینی[2] پرویز منجمی[3]

(دریافت ۸۶/۱۲/۱۷ پذیرش ۸۷/۶/۲)

چکیده

تحلیل جریان درون محیط‌های متخلخل، کاربردهای متعددی در شاخه‌های مختلف علوم و مهندسی از جمله مهندسی منابع آب، محیط‌زیست، شیمی و نفت دارد. بیشتر تحقیقاتی که در این زمینه صورت پذیرفته، بر اساس مبانی تئوریک و نتایج حاصل از مشاهدات آزمایشگاهی دارسی و فورشهایمر است. در دهه اخیر، به دلیل نیاز به بررسی جریان‌های دو و یا سه بعدی و همچنین تحلیل برخی از پیچیدگی‌های جریان درون محیط‌های متخلخل، مدل‌های شبکه‌ای نظر بسیاری از پژوهشگران را به خود جلب کرده است. در این مدل‌ها، خلل و فرج موجود در محیط متخلخل، به صورت شبکه‌ای از حفره‌ها و مجاری به هم پیوسته در نظر گرفته شده و سپس با یک شبکه لوله‌ای، شبیه‌سازی می‌گردد. از آنجا که در این روش، لوله‌ها مبین مجاری و گرهها نقش حفره‌های موجود در محیط مزبور را ایفا می‌کنند، لذا تعیین ویژگی‌های فیزیکی شبکه، از جمله ابعاد آن و همچنین قطر و طول لوله‌ها متناسب با خصوصیات محیط متخلخل از اهمیت فراوانی برخوردار است. در این تحقیق، روش خاصی برای تعیین این ویژگی‌ها ارائه گردیده و با پایش گذر حجمی و پروفیل سطح آب در دو مدل آزمایشگاهی که در محل آزمایشگاه هیدرولیک دانشکده مهندسی دانشگاه شیراز ساخته شده، صحت و میزان دقت این روش مورد ارزیابی قرار گرفته است. مقایسه مشاهدات آزمایشگاهی و نتایج حاصل از مدل پیشنهادی دلالت بر این امر دارد که ۹۶ درصد از تغییرات موجود در گذر حجمی مشاهده شده، توسط مدل قابل توصیف است. علاوه بر این مقایسه پروفیل سطح آب مشاهده شده و محاسبه شده، نشان دهنده توصیف بیش از ۹۸ درصد از تغییرات حادث در پروفیل مشاهده‌ای است، که این امر نیز دلالت بر مطابقت نسبتاً مطلوب نتایج حاصل از مشاهدات آزمایشگاهی با مقادیر محاسبه شده بر مبنای مدل پیشنهادی دارد و نشان دهنده دقت مناسب مدل ارائه شده است.

واژه‌های کلیدی: محیط متخلخل، مدل شبکه‌ای، ویژگی‌های فیزیکی شبکه، شبکه لوله‌ای.

Identification of Network Physical Properties in Simulation of Flow Through Porous Media Using Network Model

Seyed Hosein Afzali[1] *Mohammad Javad Abedini*[2] *Parviz Monajemi*[3]

(Received Mar. 7, 2007 Accepted Aug. 23, 2008)

Abstract

Simulation of flow phenomena in porous media occur in many areas of sciences and engineering. It has wide applications in a variety of disciplines including water resources engineering, environmental and chemical engineering, petroleum engineering, and groundwater hydrology. Both theoretical and experimental studies conducted to further our understanding of flow and transport phenomena in porous media are based on Darcy and Forchheimer constitutive equations. In recent years, a few investigators considered converting original porous media into a 2-D and/or 3-D networks to address challenging and complex issues in porous media. Such a network can be conceptualized as consisting

۱- دانشجوی دکترا، بخش راه وساختمان، دانشکده مهندسی، دانشگاه شیراز
۲-دانشیار، بخش راه و ساختمان، دانشکده مهندسی، دانشگاه شیراز،(نویسنده مسئول)
(۰۷۱۱)۶۱۳۳۱۳۲ abedini@shirazu.ac.ir
۳- استادیار، بخش راه و ساختمان، دانشکده مهندسی، دانشگاه شیراز

1. Ph.D. Student, Dept. of Civil Engineering, School of Eng., Shiraz University
2. Assoc. Prof., Dept., of Civil Engineering, School of Eng., Shiraz University, (Corresponding Author) (+98 711) 6133132 abedini@shirazu.ac.ir
3. Assist. Prof., Dept. of Civil Engineering, School of Eng., Shiraz University

of a series of pore bodies and throats. Pore body comprises the void between grains and throat represents the channel connecting two pore bodies. The basic question is how to choose throat's length and size. In this study, two porous media of uniform size (i.e., spherical balls) but different diameters were constructed in the hydraulic laboratory of school of engineering, Shiraz University. A methodology is developed to convert each porous media into an equivalent network and the resulting network is subjected to rigorous computer simulation. Validity of such conversion is achieved via triggering and monitoring the two actual porous media in the laboratory. For this purpose, the equivalent network of first porous media is calibrated Preprint submitted to Journal of Water and Wastewater Engineering 5 May 2008 for pipe roughness using three different resistance equations. As both porous media have the same surface roughness characteristics, the equivalent network of second porous media is solved in a forward manner with different upstream heads using roughness coefficient obtained from the first porous media. Observed and simulated water surface profiles and outflow discharges from the second porous media are compared and contrasted to each other. Results show a good agreement between predicted values of the network model and experimental data obtained in the laboratory.

Keywords: Porous Media, Network Model, Network Physical Properties, Pipe Network.

۱- مقدمه

بررسی جریان سیال درون محیط‌های متخلخل کاربردهای فراوانی در بخشهای مختلف علوم و مهندسی از جمله سدهای سنگریزه‌ای، بندهای انحرافی، گابیون‌ها، موج شکن‌ها، فیلترها و مخازن آب زیرزمینی دارد. در بررسی جریان سیال در مخازن زیرزمینی، جریان درون فیلترهای شنی، حرکت شیرابه فاضلاب و دیگر آلاینده‌های مختلف درون زمین و حرکت نفت خام در مباحث مربوط به مهندسی مخازن نفت، تحلیل جریان درون محیط‌های متخلخل ضرورت پیدا می‌کند. از طرفی، به دلیل پیچیدگی‌های زیاد جریان، درون محیط‌های متخلخل و همچنین عدم امکان اندازه‌گیری پارامترهای مختلف هیدرولیکی جریان در بین ذرات، در بیشتر تحقیقاتی که تاکنون در این زمینه صورت پذیرفته، کل محیط متخلخل به صورت یک سیستم کنترل در نظر گرفته شده و بر اساس نتایج حاصل از مشاهدات آزمایشگاهی، نسبت به واسنجی روابط تجربی بین گرادیان هیدرولیکی و سرعت جریان مبتنی بر رابطه خطی (قانون دارسی[1]) و رابطه غیر خطی (قانون فورشهایمر[2]) اقدام گردیده است [۱، ۲و ۳].

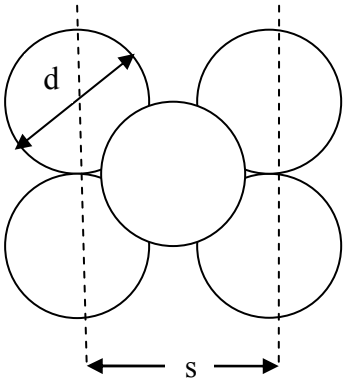
در دهه اخیر، به دلیل نیاز به بررسی جریانهای دو و یا سه بعدی و تحلیل برخی از پیچیدگی‌های آنها و همچنین وجود محدودیتهای فراوان در مدل‌های تجربی قبلی، استفاده از مدل‌های شبکه‌ای مورد توجه بسیاری از محققان قرار گرفته است [۴-۷].

در این مدل‌ها، محیط متخلخل به صورت شبکه‌ای از حفره‌ها و مجاری به هم پیوسته در نظر گرفته شده و با شبیه‌سازی هر مجرا با یک لوله، به گونه‌ای که محل اتصال این لوله‌ها نقش حفره را ایفا کند، کل محیط به صورت یک شبکه لوله‌ای شبیه‌سازی می‌گردد [۸، ۹ و ۱۰]. در این دیدگاه، جریان عملاً حاصل حرکت سیال در بین حفره‌ها و مجاری موجود در محیط بوده و بالطبع ابعاد این حفره‌ها و مجاری و همچنین چگونگی توزیع آنها، در میزان حجم جریان خروجی و دیگر خصوصیات آن اثر مستقیم دارد. حال با توجه به اینکه در مدل‌های شبکه‌ای، گرهها و لوله‌های موجود در شبکه، مبین حفره‌ها و مجاری موجود در محیط متخلخل هستند، لذا مهم‌ترین مسئله در مبحث مدل‌های شبکه‌ای، تعیین ویژگی‌های فیزیکی شبکه، از جمله ابعاد آن و طول و قطر لوله‌ها متناسب با شکل، اندازه و توزیع خلل و فرج موجود در محیط متخلخل است. در راستای استفاده از مدل‌های شبکه‌ای، برخی از پژوهشگران، از توابع توزیع آماری برای تعیین ویژگی‌های فیزیکی شبکه بهره جسته‌اند [۱۱و ۱۲]. اما چنانچه به هر دلیل، محیط متخلخل از ذرات کروی کاملاً یکسان ساخته شده باشد، به دلیل عدم وجود تغییر در پارامترها و یکسان بودن ابعاد و توزیع یکنواخت فضای خالی بین ذرات، استفاده از توابع توزیع آماری کاربرد چندانی ندارد. لازم به ذکر است، یکی از روشهای تحلیل جریان درون محیط‌های متخلخل، شبیه‌سازی محیط طبیعی با محیطی است که از ذرات کروی یکسان تشکیل شده است. این محیط کاملاً همگن با استفاده از مبانی مربوط به مدل‌های شبکه‌ای، به یک شبکه لوله‌ای تبدیل شده و با بررسی جریان درون آن، حرکت سیال درون محیط متخلخل مورد بررسی قرار می‌گیرد [۱۳]. در تحقیق حاضر، با بررسی آزمایشگاهی حرکت سیال درون محیط متخلخل متشکل از ذرات کروی هم شکل، روش خاصی برای تعیین ویژگی‌های فیزیکی شبکه معادل محیط مزبور ارائه گردیده و در ادامه، صحت و سقم این روش با استفاده از نتایج حاصل از اجرای دو مدل آزمایشگاهی مورد ارزیابی قرار می‌گیرد.

[1] Darcy
[2] Forchheimer

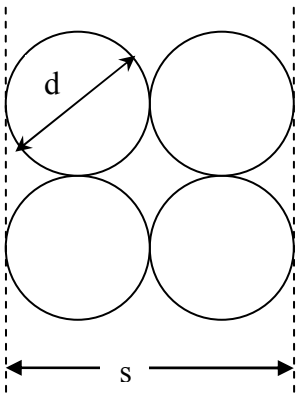
۲- مورفولوژی حفره‌ها و مجاری

خصوصیات جریان درون محیط‌های متخلخل با ذرات کروی، متناسب با حجم فضای خالی و چگونگی توزیع آن درون محیط مزبور، تغییر می‌کند. از طرفی حجم فضای خالی درون چنین محیط‌هایی، بسته به نحوه چیدمان ذرات کنار یکدیگر از حداقل فضا تا حداکثر فضا تغییر می‌کند [۱۴]. چنانچه نحوه چینش ذرات مانند شکل ۱ باشد، فضای خالی بین آنها به حداقل خود می‌رسد؛ در صورتی که، حداکثر فضای خالی وقتی ایجاد می‌گردد که ذرات مطابق شکل ۲ کنار هم قرار بگیرند. از آنجایی که در محیط‌های طبیعی، ذرات در پایدارترین حالت خود، کنار یکدیگر قرار می‌گیرند و در محیط‌های دست ریز نیز، به دلیل نحوه ریختن دانه‌ها و کوبیدن آنها، مصالح کاملاً متراکم شده و حداقل فضای خالی بین آنها ایجاد می‌گردد، در هنگام مدل‌سازی، محیط‌های مزبور مطابق شکل ۱ در نظر گرفته می‌شوند.



عرض کوچک‌ترین واحد تکرار شونده (S=1.633d)

شکل ۱- محیط متخلخل با ذرات کروی با حداقل فضای خالی



عرض بزرگ‌ترین واحد تکرار شونده (S=2d)

شکل ۲- محیط متخلخل با ذرات کروی با حداکثر فضای خالی

توزیع حفره‌ها و مجاری مختلف در محیطی همانند شکل ۱، کاملاً یکنواخت و منظم است، اما شکل آنها، بسیار پیچیده بوده و شناخت خطوط جریان و تحلیل آنها در چنین فضای پیچیده‌ای بسیار مشکل می‌باشد؛ به همین دلیل در راستای بررسی جریان درون محیط متخلخل با ذرات کروی، محیط مزبور با شبکه‌ای از لوله‌های استوانه‌ای، معادل‌سازی می‌گردد. البته در این نوع شبیه‌سازی، مهم‌ترین مسئله، تعیین ابعاد شبکه، قطر و طول لوله‌ها متناسب با قطر ذرات است. ضریب زبری نیز، از دیگر پارامترهایی است که بایستی متناسب با جنس مصالح محیط و میزان افتهای موضعی ایجاد شده در محل حفره‌ها، مشخص گردد.

ذرات تشکیل دهندهٔ محیط‌های متخلخل طبیعی، اغلب دارای شکلها، ابعاد و توزیع بسیار متنوعی هستند و به دلیل همین تغییر در پارامترهای فیزیکی و مصالح، امکان استفاده از توابع توزیع آماری، برای تعیین ویژگی‌های فیزیکی شبکهٔ معادل میسر می‌گردد [۱۲]. در صورتی که در محیط‌های با ذرات کروی یکسان، همه پارامترها یکسان بوده و در نتیجه توابع آماری در تعیین خصوصیات شبکهٔ معادل چندان کاربردی ندارند.

۳- تعیین ویژگی‌های فیزیکی شبکه معادل

در مبحث تحلیل جریان درون محیط‌های متخلخل با استفاده از مدل شبکه‌ای، ابعاد شبکه، ضریب زبری، طول و قطر لوله‌ها متناسب با ابعاد، جنس محیط و همچنین شکل، اندازه و توزیع خلل و فرج موجود در بین ذرات تشکیل دهندهٔ آن تعیین می‌گردد [۷]. در این تحقیق، تعیین این ویژگی‌ها بر اساس فرضیات منطقی زیر صورت پذیرفته است:

- ابعاد کل شبکه با ابعاد محیط متخلخل یکسان فرض می‌شود.
- از آنجا که میزان جریان عبوری از محیط متخلخل متناسب با حجم فضای خالی درون آن است، لذا حجم فضاهای خالی درون لوله‌های شبکه، معادل کل حجم فضای خالی درون محیط در نظر گرفته می‌شود.
- گره‌ها در این شبکه، نقش حفره‌های موجود در محیط متخلخل را ایفا کرده و به همین دلیل مختصات آنها برابر با مختصات حفره‌های متناظر با آنها در محیط مزبور در نظر گرفته می‌شود.
- شعاع هیدرولیکی جریان درون محیط متخلخل (بر اساس تعریف تیلور[1]) با شعاع هیدرولیکی جریان درون شبکه برابر گرفته می‌شود [۱۵].

با مد نظر قراردادن فرضیات فوق، روند محاسبه مشخصات شبکه معادل در ادامه آورده شده است.

[1] Taylor

۳-۱- محاسبه نسبت تخلخل محیط متخلخل با ذرات کروی

چنانچه ذرات کروی، در پایدارترین حالت خود کنار یکدیگر قرار گیرند، حداقل فضای خالی بین آنها ایجاد می‌گردد (شکلهای ۱ و ۳). برای تعیین نسبت تخلخل در چنین محیطی، ابتدا فرض می‌شود محیط مزبور از M کره در طول، N کره در ارتفاع و P کره در عرض تشکیل شده باشد. کوچک‌ترین مقطع تکرار شونده در چنین محیطی (در جهت عرض)، از M کره در طول، N کره در ارتفاع و دو کره در عرض تشکیل شده است. در این حالت با توجه به اینکه بعضی از کره‌ها در گودی ایجاد شده در بین کره‌های دیگر قرار می‌گیرند، چیدمان ذرات مطابق شکل ۳ صورت پذیرفته و عرض مقطع برابر با ۱/۶۳۳d خواهد بود و در نتیجه نسبت تخلخل و به تبع آن درجه پوکی در چنین محیطی برابر خواهد بود با

$$V_T = 1.633MNd^3 \qquad (۱)$$

$$V_S = 2MN\left(\frac{4}{3}\pi\left(\frac{d}{2}\right)^3\right) = \frac{1}{3}MN\,\pi d^3 \qquad (۲)$$

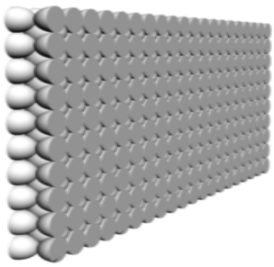
$$e = \frac{V_T - V_S}{V_S} = 0.559 \qquad (۳)$$

$$n = \frac{e}{1+e} = 0.359 \qquad (۴)$$

که در این روابط

d قطر ذرات، e نسبت تخلخل، n درجه پوکی، V_T حجم کل مقطع و V_S حجم ذرات کروی موجود در مقطع است.

همان گونه که ملاحظه می‌گردد، ضریب پوکی مستقل از قطر ذرات بوده و صرفاً به نحوه چیدمان آنها بستگی دارد.



شکل ۳- کوچک‌ترین مقطع تکرار شونده در محیط متخلخل با ذرات کروی با حداقل فضای خالی

۳-۲- محاسبه شعاع هیدرولیکی جریان درون محیط متخلخل

شعاع هیدرولیکی در هر مقطعی از جریان برابر با نسبت سطح جریان به محیط تر شده است. تیلور، شعاع هیدرولیکی جریان درون محیط متخلخل را به صورت نسبتی از حجم جریان به کل سطح تر شده بیان نمود [۲ و ۱۵]. به این ترتیب، شعاع هیدرولیکی برابر خواهد بود با

$$R = \frac{V_V}{S_A} \qquad (۵)$$

که در این رابطه

R شعاع هیدرولیکی، V_V حجم فضای خالی درون حجم کنترل (مجموع حجم خلل و فرج داخل محیط) و S_A سطح جانبی فضای خالی مربوط به V_V می‌باشد.

به عبارتی دیگر، R برابر خواهد بود با

$$R = \frac{V_T n}{A_{MS} M_R} \qquad (۶)$$

و یا

$$R = \frac{e}{A_{vs}} \qquad (۷)$$

که در این روابط

V_T حجم کل محیط متخلخل، n درجه پوکی، e نسبت تخلخل، A_{MS} سطح مخصوص واحد جرم[1]، A_{vs} سطح مخصوص واحد حجم[2] و M_R جرم ذرات تشکیل دهنده محیط است. با توجه به تعاریف بالا خواهیم داشت

$$A_{VS} = \rho A_{MS} \qquad (۸)$$

که ρ، دانسیته ذرات محیط است.

اگر محیط متخلخل از ذرات کروی به قطر d تشکیل شده باشد، عملاً رابطه زیر برقرار خواهد بود

$$A_{VS} = \frac{\pi d^2}{(\frac{1}{6}\pi d^3)} = \frac{6}{d} \qquad (۹)$$

و در نتیجه شعاع هیدرولیکی جریان درون محیط‌های متخلخل با ذرات کروی، برابر است با

$$R = \frac{ed}{6} \qquad (۱۰)$$

همان گونه که ذکر گردید، چنانچه ذرات کروی تشکیل دهندهٔ یک محیط متخلخل در پایدارترین حالت خود کنار یکدیگر قرار گیرند، نسبت تخلخل و درجه پوکی محیط مزبور، مستقل از قطر ذرات بوده و مقدار ثابتی خواهد داشت. لذا با توجه به روابط ۴ و ۱۰، مقدار شعاع هیدرولیکی برابر خواهد شد با

$$R = 0.559d/6 = 0.093d \qquad (۱۱)$$

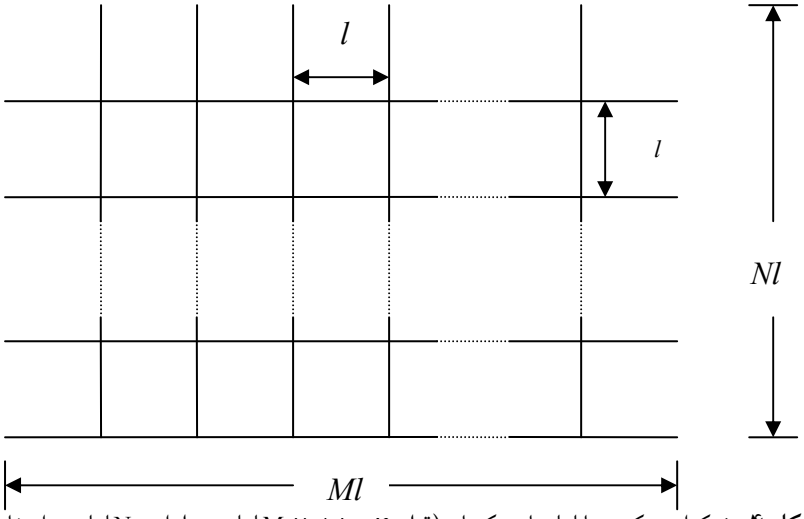
که در این رابطه

d قطر ذرات کروی است.

۳-۳- تعیین طول و قطر لوله‌ها در شبکه معادل

چنانچه شبکه‌ای ترکیبی با لوله‌های یکسان (قطر D و طول l)، از M لوله در طول و N لوله در ارتفاع ساخته شده باشد (شکل ۴)، دارای طولی معادل Ml و ارتفاعی معادل Nl خواهد بود. بر اساس روش

[1] Mass-Specific Surface Area
[2] Volume-Specific Surface Area



شکل ۴- شبکه‌ای ترکیبی با لوله‌های یکسان (قطر D و طول l)،M لوله در طول و N لوله در ارتفاع

مفهومی تیلور، شعاع هیدرولیکی در چنین شبکه‌ای، برابر خواهد بود با نسبت حجم کل سیال درون لوله‌ها (در حالت پر) به سطح تر شده در لوله‌ها [۱۵].

به این ترتیب در شبکه مزبور حجم کل سیال در حالت پر، معادل حجم داخلی کل لوله‌ها (V_T) و سطح تر شده برابر با سطح داخلی کل لوله‌ها (S_T)خواهد بود. این مقادیر عبارت‌اند از [۱]:

$$V_T = 2MN\left(\frac{\pi D^2}{4}\right)l \qquad (۱۲)$$

$$S_T = 2MN(\pi D)l$$

و در نتیجه :

$$R = \frac{V_T}{S_T} = \frac{D}{4} \Rightarrow D = 4R \qquad (۱۳)$$

حال برای تعیین قطر لوله‌ها در شبکه معادل، کافیست شعاع هیدرولیکی جریان درون محیط متخلخل، با شعاع هیدرولیکی جریان درون شبکه معادل برابر گرفته شود. لذا با توجه به مقدار R در محیط متخلخل با ذرات کروی (روابط ۱۱ و ۱۳) خواهیم داشت.

$$D = 0.373d \qquad (۱۴)$$

به این ترتیب قطر لوله‌ها در شبکه معادل، به صورت ضریبی از قطر ذرات کروی تعیین می‌گردد.

به منظور تعیین طول لوله در شبکه معادل، فضای خالی درون شبکه با فضای خالی درون محیط متخلخل (با ذرات کروی به قطر d) معادل گرفته می‌شود. با توجه به این فرض که ابعاد شبکه با ابعاد محیط متخلخل یکسان فرض می‌گردد، با برابر قرار دادن درجه پوکی در هر دو محیط، حجم فضای خالی یکسان می‌شود.

چنانچه محیط متخلخل از M کره در طول و N کره در ارتفاع و دو کره در عرض، با چیدمانی شبیه شکل ۱ ساخته شده باشد، خواهیم داشت

$$V_S = 2MN\left(\frac{4}{3}\pi\left(\frac{d}{2}\right)^3\right) = \frac{1}{3}MN\,\pi d^3 \qquad (۱۵)$$

$$e = \frac{V_v}{V_s} \qquad (۱۶)$$

$$V_v = e.V_s = (0.559)\frac{1}{3}MN\pi d^3 \qquad (۱۷)$$

$$V_v = 0.186\ (MN\pi d^3) \qquad (۱۸)$$

که در این روابط

V_S حجم کل کره‌ها و V_V حجم فضای خالی بین آنها است.

حال اگر به ازای هر حفره، یک گره و به جای هر مجرا، یک لوله در نظر گرفته شود، شبکهٔ معادل محیط فوق الذکر، M لوله در طول و N لوله در ارتفاع خواهد داشت. اگر طول هر لوله،l فرض شود، کل حجم فضای خالی درون این شبکه برابر خواهد بود با:

$$V_v = 2MN\left(\frac{\pi D^2}{4}\right)l \qquad (۱۹)$$

با توجه به روابط ۱۸ و ۱۹خواهیم داشت

$$l = 2.67d \qquad (۲۰)$$

با توجه به مطالب فوق، برای محیط متخلخلی شبیه شکل۳ که از ذرات کروی با قطر d تشکیل شده باشد، ویژگی‌های فیزیکی شبکهٔ معادل در فضای دو بعدی به شرح زیر خواهند بود:

طول شبکه برابر با طول محیط متخلخل؛

ارتفاع شبکه برابر با ارتفاع محیط متخلخل؛

---

[۱] با توجه به شکل ۴ کل فضای خالی درون شبکه ترکیبی، معادل $V_T = (2MN - N)(\frac{\pi D^2}{4})l$ خواهد بود، اما از آنجا که به دلیل بزرگی مقادیر M و N، در عمل $N \ll 2MN$ می‌باشد، به همین دلیل در معادله فوق از N در مقایسه با2MN صرف‌نظر می گردد.

قطر لوله‌ها معادل $D = ۰/۳۷۳d$؛

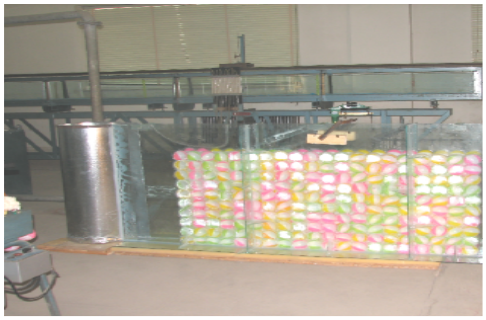
طول لوله‌ها برابر با $l = ۲/۶۷d$.

برای ارزیابی صحت و کارایی مدل شبکه ترکیبی، روش پیشنهادی برای آنالیز آن و همچنین روشهای ارائه شده برای تعیین پارامترهای فیزیکی مورد نیاز در شبکهٔ معادل، یک‌سری مطالعات آزمایشگاهی صورت پذیرفته است. با مقایسه نتایج حاصل از مشاهدات آزمایشگاهی و نتایجی که از اجرای مدل ارائه شده به دست می‌آید، عملاً دقت و صحت مدل‌های پیشنهادی در این پژوهش مورد بررسی قرار می‌گیرند.

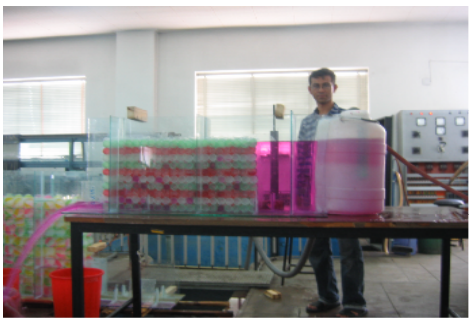
۴- معرفی مدل آزمایشگاهی

به منظور ارزیابی صحت و میزان دقت روابط پیشنهادی برای تعیین ویژگی‌های فیزیکی شبکه معادل، اقدام به طراحی و ساخت دو مدل آزمایشگاهی در محل آزمایشگاه هیدرولیک دانشکده مهندسی دانشگاه شیراز گردید. نحوه ساخت هر دو مدل یکسان بود و تنها قطر ذرات کروی در دو مدل متفاوت بود. هدف از ساخت دو مدل متخلخل با استفاده از توپهای همجنس با قطرهای متفاوت، علاوه بر کنترل کارایی و میزان دقت روابط پیشنهادی در این تحقیق، بررسی صحت روابط و معادلات ارائه شده در برنامه آنالیز شبکه‌های ترکیبی بود. در این راستا ابتدا با استفاده از نتایج حاصل از آزمایش مدل توپی ۷/۵ سانتی‌متری، ضریب زبری بدنه توپها به عنوان پارامتر واسنجی، تعیین می‌گردد. سپس با توجه به یکسان بودن جنس توپها از همین ضریب در محاسبات مربوط به آنالیز شبکه معادل محیط توپی با قطر کوچک‌تر استفاده می‌گردد. چنانچه نتایج حاصل از تحریک سیستم اخیر برای مقادیر مختلف ارتفاع آب در بالادست با مقادیر مشاهده‌ای نظیر آنها، همخوانی معنی‌داری داشته باشد، همخوانی مزبور منجر به تأیید فرضیات به کار رفته در روابط هندسی شبکهٔ معادل خواهد گردید.

هر مدل از ۴۰۰ عدد توپ پلاستیکی ساخته شده (شکلهای ۵ و ۶)، به گونه‌ای که امکان بررسی و مطالعه جریانهای دو بعدی در یک محیط متخلخل و کاملاً همگن و ایزوتروپ با ذرات کروی، میسّر



شکل ۵- محیط متخلخل توپی با قطر ۷/۵ سانتی‌متر



شکل ۶- محیط متخلخل توپی با قطر ۳/۷ سانتی‌متر

جدول ۱- مشخصات هندسی شبکه های معادل دو مدل آزمایشگاهی

مدل	قطر ذرات (cm)	طول محیط (cm)	ارتفاع محیط (cm)	طول شبکه (cm)	ارتفاع شبکه (cm)	طول لوله‌ها (cm)	عرض لوله ها (cm)
۱	۷/۵	۱۵۰	۷۵	۱۵۰	۷۵	۲/۷۹۷۵	۲۰/۰۲۵
۲	۳/۷	۷۴	۳۷	۷۴	۷۴	۱/۳۸۰۱	۹/۸۷۹

می‌گردد. در جدول ۱، ویژگی‌های هندسی شبکهٔ معادل دو مدل آزمایشگاهی بر اساس روابط ارائه شده در بخشهای قبل، نشان داده شده است.

در هر دو مدل، گذر حجمی خروجی از محیط و همچنین پروفیل سطح آب به عنوان متغیرهای حالت، برای شرایط مختلف ارتفاع آب بالا دست مورد پایش قرار گرفته‌اند.

۵- بررسی نتایج آزمایشگاهی

حفره‌ها و مجاری موجود در اطراف اغلب محیط‌های متخلخل از جمله این دو محیط آزمایشگاهی، در ارتباط مستقیم با اتمسفر بوده و به همین دلیل در هیچ نقطه‌ای از آنها، امکان ایجاد فشار منفی وجود ندارد، به خصوص وقتی که، ذرات درشت دانه بوده و اثر مویینگی بسیار ناچیز باشد. در چنین شرایطی شبکهٔ معادل، دارای ویژگی خاصی بوده به گونه‌ای که کلیه لوله‌ها در سه طرف آن، همگی باز و در ارتباط با هوا هستند. آنالیز چنین شبکه‌هایی با استفاده از روشهای متداول امکان پذیر نبوده و به همین دلیل شبکهٔ معادل محیط‌های آزمایشگاهی مورد مطالعه در این تحقیق، با استفاده از روش خاصی که برای اولین بار توسط نویسندگان این مقاله تدوین و در قالب یک نرم افزار ارائه گردیده، مورد آنالیز قرار گرفته‌اند [۱۳].

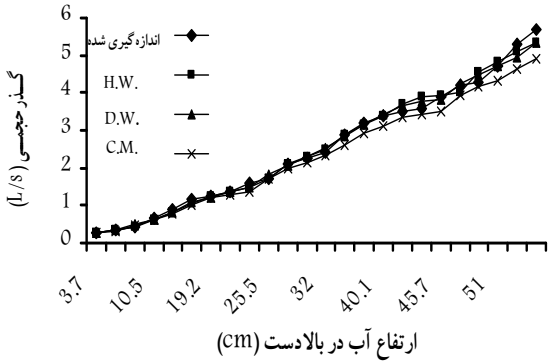
حال با توجه به اینکه هر مدل، متناسب با تعداد درجات آزادی موجود در آن، واسنجی می‌گردد، ضریب زبری سطح جداره لوله‌ها در این مدل، متناسب با زبری سطح توپهای پلاستیکی به عنوان پارامتر واسنجی انتخاب گردیده و با بهره‌گیری از نتایج تعدادی از

آزمایش‌های مربوط به پایش گذر حجمی و پروفیل سطح آب مبادرت به واسنجی مدل شده است.

از آنجا که در این تحقیق، برای آنالیز شبکهٔ معادل از هر سه معادله متعارف مقاومت، اعم از معادله دارسی- وایسباخ، معادله هیزن- ویلیام و معادله شزی- مانینگ استفاده گردیده و جنس توپها در هر دو مدل یکسان است، لذا پارامترهای زبری به دست آمده در هر دو مدل به ترتیب عبارت‌اند از:

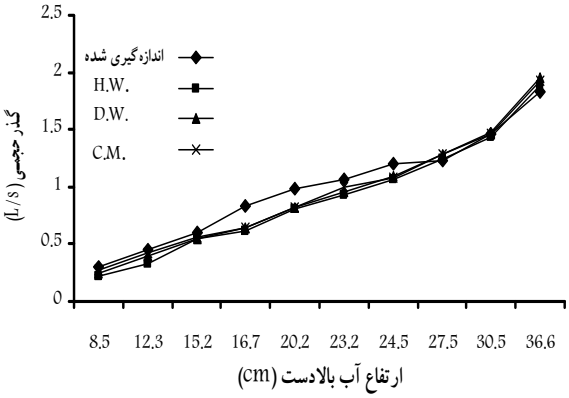
$$n = 0.009 \text{ ، } \varepsilon = 0.1 \text{ mm ، } C_{H.W.} = 115$$

در شکلهای ۷ و ۸ مقادیر گذر حجمی مشاهده شده و محاسبه شده برحسب مقادیر مختلف ارتفاع آب بالا دست و برای معادلات مختلف مقاومت، برای دو نمونه توپی به گونه‌ای مقایسه‌ای آورده شده است. مجدداً تاکید می‌گردد که مقادیر زبری با تحریک مدل



شکل ۷- مقادیر حجمی مشاهده شده و محاسبه شده برحسب مقادیر مختلف ارتفاع آب بالا دست و برای معادلات مختلف مقاومت برای مدل توپی ۷/۵ سانتی‌متری

(H.W.: هیزن- ویلیام، D.W.: دارسی- وایسباخ، C.M.: شزی- مانینگ)

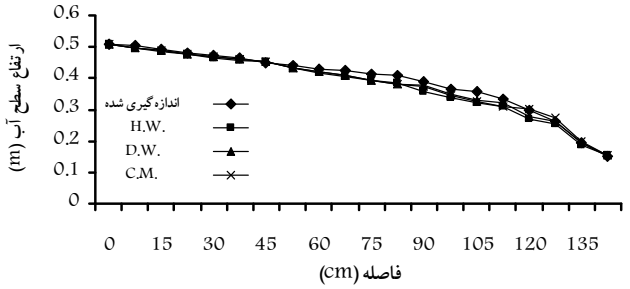


شکل ۸- مقادیر گذر حجمی مشاهده شده و محاسبه شده برحسب مقادیر مختلف ارتفاع آب بالا دست و برای معادلات مختلف مقاومت برای مدل توپی ۳/۷ سانتی‌متری

(H.W.: هیزن- ویلیام، D.W.: دارسی- وایسباخ، C.M.: شزی- مانینگ)

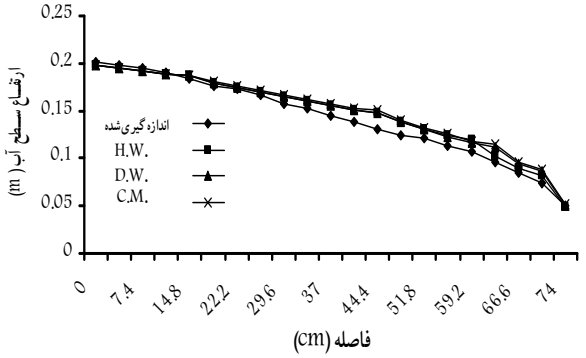
توپی ۷/۵ سانتی‌متری به دست آمده و با تثبیت آنها در مدل توپی ۳/۷ سانتی‌متری، مقادیر گذر حجمی و همچنین پروفیل سطح آب محاسبه‌ای و مشاهده‌ای برای بلنداهای مختلف با یکدیگر مقایسه گشته‌اند. در سالهای اخیر، ارزیابی صحت اعتبار مدل‌های ریاضی و نرم‌افزاری با رویداشت به انطباق نسبی گذر حجمی در پایین دست مورد انتقاد قرار گرفته و بحث صحت سنجی داخلی[1] مدل‌ها، به عنوان یک شاخص مناسب برای ارزیابی آنها پیشنهاد شده است. در این راستا با پایش عمق آب در نقاط مختلف دو مدل آزمایشگاهی و مقایسه آنها با نتایج حاصل از مدل ریاضی مبادرت به بررسی اعتبار روش پیشنهادی گردیده است [۱۶ و ۱۷].

شکلهای ۹ و ۱۰ پروفیل عمق آب مشاهداتی و محاسباتی را برحسب فاصله در داخل محیط‌های توپی برای روابط مقاومت مختلف و ارتفاع معینی از آب بالا دست نشان می‌دهند.



شکل ۹- پروفیل سطح آب در مدل توپی ۳/۷ سانتی‌متری برای تراز آب بالادست معادل ۲۰/۲ سانتی‌متری

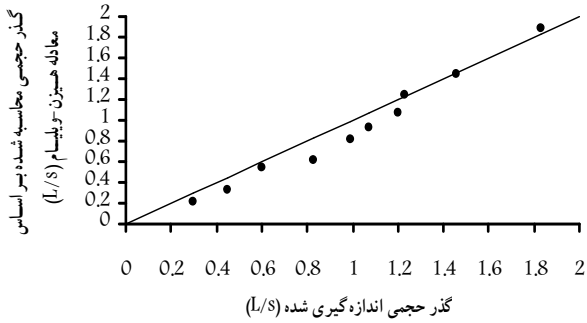
(H.W.: هیزن- ویلیام، D.W.: دارسی- وایسباخ، C.M.: شزی- مانینگ)



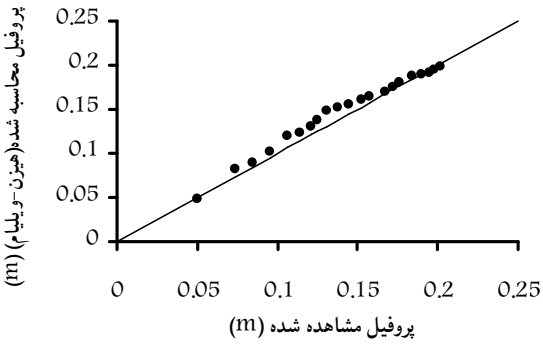
شکل ۱۰- پروفیل سطح آب در مدل توپی ۷/۵ سانتی‌متری برای تراز آب بالادست معادل ۵۲ سانتی‌متر

(H.W.: هیزن- ویلیام، D.W.: دارسی- وایسباخ، C.M.: شزی- مانینگ)

[1] Internal Validation



شکل ۱۱- مقادیر گذر حجمی مشاهده شده و محاسبه شده نظیر آن بر اساس معادله هیزن- ویلیام برای مدل توپی ۳/۷ سانتی‌متری



شکل ۱۲- مقادیر عمق جریان مشاهده شده برحسب مقادیر عمق محاسبه شده بر اساس معادله هیزن- ویلیام برای مدل توپی ۳/۷ سانتی‌متری

همچنین به منظور بررسی دقیق‌تر صحت روش، در شکل ۱۱ مقادیر گذر حجمی محاسبه شده بر اساس معادله هیزن- ویلیام برحسب گذر حجمی مشاهده شده نظیر آنها نمایش داده شده و در شکل ۱۲، مقادیر عمق جریان مشاهده شده برحسب مقادیر عمق محاسبه شده بر اساس همان معادله هیزن- ویلیام نشان داده شده است. هر دو شکل مربوط به مدل توپی ۳/۷ سانتی‌متری است. همان‌طور که ملاحظه می‌شود، نتایج حاصل از شبیه‌سازی مطابقت بسیار مطلوبی با نتایج مشاهداتی دارد.

۶- نتیجه گیری

با توجه به لزوم تحلیل جریان‌های دو یا سه بعدی درون محیط‌های متخلخل، به دلیل دامنه وسیع کاربرد آنها در صنعت و شاخه‌های مختلف علوم و مهندسی و همچنین نیاز به تحلیل برخی از پیچیدگی‌های آنها، در سالهای اخیر، استفاده از مدل‌های شبکه‌ای توجه بسیاری از محققان را به خود جلب کرده است. در مدل‌های مزبور، لوله‌ها نقش مجاری موجود در محیط متخلخل را ایفا کرده و گره‌ها مبین حفره‌های موجود در محل اتصال مجاری هستند، لذا مهم‌ترین مسئله در مبحث مدل‌های شبکه‌ای، تعیین ویژگی‌های فیزیکی شبکهٔ معادل، متناسب با خصوصیات فیزیکی محیط متخلخل است. بر اساس مطالعات انجام شده در این تحقیق، برای محیط‌های متخلخل همگن و ایزوتروپی که از ذرات کروی یکسان ساخته شده، ابعاد شبکه برابر با ابعاد محیط و طول و قطر لوله‌ها، در همه جهات یکسان و صرفاً بر مبنای قطر ذرات کروی تعیین می‌گردند. روابط ارائه شده برای تعیین این ویژگی‌ها با استفاده از نتایج حاصل از اجرای دو مدل آزمایشگاهی مورد ارزیابی قرار گرفته‌اند.

مقایسه میزان گذر حجمی و همچنین پروفیل سطح آب محاسبه شده از آنالیز شبکه‌هایی که با استفاده از روش پیشنهادی تعیین گردیده، با مقادیر مشاهده شدهٔ این دو کمیت در محیط‌های آزمایشگاهی متناظر آنها، دلالت بر انطباق نسبتاً مطلوبی بین مقادیر مشاهداتی و محاسباتی داشته و صحت روش را با دقت مناسبی تأیید می‌نماید.

۷- مراجع

1- Herrera, N. M., and Felton, G. K. (1991). "Hydraulics of flow through a rockfill dam using sediment-free water, Trans." *ASAE*, 34(3), 871-875.

2- Li, B., Garga, V. K., and Davies, M. H. (1998). "Relationship for non-Darcy flow in rockfill." *J. Hydraul. Eng.,* ASCE, 124(2), 206-212.

3- Sidiropoulou, M. G., Moutsopoulos, K. N., and Tsihrintzis, V. A. (2007). "Determination of Forchheimer equation coefficients." *Hydrol. Process.*, 21, 534-554.

4- Thauvin, F., and Mohanty, K. K. (1998). "Network modeling of non-Darcy flow through porous media." *Transport Porous Med.,* 31 (1), 19-37.

5- Wang, X., Thauvin, F., and Mohanty, K. K. (1999). "Non-Darcy flow through anisotropic porous media. " *Chem. Eng. Sci.,* 54 (12), 1859-1869.

6- Al-Raoush, R., Thompson, K., and Wilson, C. S. (2003). "Comparison of network generation techniques for unconsolidated porous media." *J. Soil Sci. Soc. Am.,* 67(1), 1678-1700.
7- Acharya, R. C., Zee, S. E. A. T. M., and Leijnse, A. (2004). "Porosity-permeability properties generated with a new 2-parameter 3D hydraulic pore-network model for consolidated and unconsolidated porous media." *Adv. Water Resour.,* 27, 707-723.
8- Fischer, U., and Celia, M. A. (1999). "Prediction of relative and absolute permeabilities for gas and water from soil water retention curves using a pore-scale network model." *Water Resour. Res.,* 35(4), 1089-1100.
9- Held, R. J., and Celia, M. A. (2001a). "Modeling support of functional relationships between capillary pressure, saturation, interfacial area and common lines." *Adv. Water Resour.,* 24 (3,4), 325-343.
10- Held, R. J., and Celia, M. A. (2001b). "Pore-scale modeling extension of constitutive relationships in the range of residual saturations." *Water Resour. Res.,* 37(1), 165-170.
11- Haring, R. E., and Greenkorn, R. A. (1970). "A statistical model of a porous medium with nonuniform pores." *J. AICHE.,* 16(3), 477- 483.
12- Lupton, R. (1993). *Statistics in theory and practice*, 22ed Ed., Princeton University Press, Princeton, N. J.
۱۳- افضلی، س. ح.، عابدینی، م. ج.، و منجمی، پ. (۱۳۸۷). "شبیه سازی جریان آب در محیط متخلخل با بهره‌گیری از شبکه ترکیبی تحت فشار-سطح آزاد متشکل از مجاری به هم پیوسته." *م. تحقیقات منابع آب ایران*، در دست چاپ.
14- Martins, A. A., Laranjeira, P. E., Lopes, J. C. B., and Dias, M. M. (2007). "Network modeling flow in a packed bed." *J. AICHE,* 53 (1), 91-107.
15- Taylor, D. W. (1948). *Fundamental of soil mechanics,* John Wiley and Sons Inc., New York.
16- Beven, K. J. (1993). "Prophecy, reality and uncertainty in distributed hydrological modeling." Adv. Water Resour., 16 (1), 41-51.
17- Beven, K. J. (2000). "Uniqueness of place and process representations in hydrological modeling." Hydrol. Earth Syst. Sci., 4(2), 203-213.